

津田沼航空研究会における滑空機の開発について

日大生産工 ○西澤 優里 日大生産工(院) 阿部 翔一 日大生産工(院) 鈴木 亮雅
日大生産工 坂梨 公亮 日大生産工 菅沼 祐介

1 緒言

鳥人間コンテスト選手権大会(読売テレビ主催)が毎夏、琵琶湖に面した滋賀県彦根市松原町松原水泳場で行われている。津田沼航空研究会は1996年の初出場以来13回の出場記録を持ち、滑空機部門での優勝を目的として滑空機開発および製作を行っている。これまでに2006年に252.6 mを記録し準優勝、2013年は296.6 mという結果を残した。しかしながら、近年の滑空機部門は出場機の性能向上により、優勝のためには400 m以上のフライトがほぼ必須となっており、近年は入賞から遠ざかっていた。そこで2014年以降は400 m以上のフライトを実現するために、従来機から設計コンセプトを一新した機体の開発を行ってきた。複数回の機体製作、試験飛行および大会への出場を通じて様々な問題点を明らかにし、解決のための研究開発を重ねてきた。数々の問題点を克服した2017年出場機体「Squalo」は目標の400 mを大きく超える440.37 mを記録し、初優勝を飾った。

本報では2017年出場機体「Squalo」の機体の開発を中心に第40回鳥人間コンテスト選手権大会滑空機部門において440.37 mという大記録を生み出すまでに取り組んできた設計コンセプトの構築、設計、製作および試験飛行において判明した問題点とその解決策といった点を踏まえつつ、津田沼航空研究会における滑空機の開発について報告する。

2 機体コンセプト・設計

滑空機部門は湖面より10 mの高さのプラットフォームより発進し、滑空距離で優劣を決する部門である。また、機体は自作であること、およびパイロットなどの安全に十分に考慮することが求められ、機体重量や機体寸法については自由である。そこで各チームでは自由な発想で機体の開発が行われている。特に近年はアスペクト比および翼面荷重を増大する傾向にある。また、水面近傍を飛行することで誘導抗力

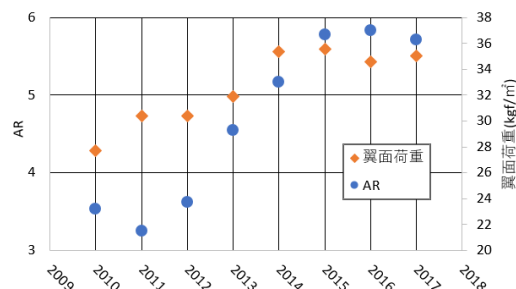


図1 2010年以降の翼面荷重とARの変遷。

の減少と揚力の増大が起こる地面効果の利用も積極的に行われている。そこで、これらを取り込んだ機体コンセプトのもとで機体の開発を行ってきた。

図1にこれまでに津田沼航空研究会が開発を行ってきた機体の翼面荷重とアスペクト比の変遷を示す。高アスペクト比・高翼面荷重を明確化した2014年出場機体「秋水」以降、アスペクト比は30、翼面荷重は5 kgf/m²を超えた設計となっている。アスペクト比を大きくすることには誘導抗力を削減し、揚抗比を増加させる狙いがある。また、主翼風圧中心の絶対的な移動量が小さくなるため安定性が向上する。翼面荷重の増大は飛行速度の増大を意図している。飛行速度を増大させることでフライト時の直進性の向上と誘導抗力の削減を狙った。

上記の機体の特性に合わせ、新たにフライトプランを決定した。高速機かつ地面効果の利用を意図した機体において適するフライトプランはダイブ飛行であると考えた。ダイブ飛行とはプラットフォームからの発進後、一気に高度を落として位置エネルギーを運動エネルギーに変換することで高速機として十分な対気速度を確保し、速度獲得後は速やかに機首の引き起こしを行うことで、フライトの早期から誘導効力を減らすことのできる地面効果が得られるフライトプランである。この方法は九州大学、首都大学東京および三鷹茂原下横田などの高速機を設計し、かつ上位入賞するチームも取り

Development of a Glider in Tsudanuma Aero Team

Yuri NISHIZAWA, Shoichi ABE, Ryoga SUZUKI, Kousuke SAKANASHI and Yusuke SUGANUMA

入れている。しかしながら、ダイブ飛行はパイロットの技術が大きく影響し、特に初フライトとなるパイロットや、毎年パイロットが変わる学生チームには不利な点がある。津田沼航空研究会においても2014年度大会においてダイブ飛行を試みたが、機体の引き起こすことができず、湖面に衝突した。そのため2017年度では、フライトプランを離陸後十分な高度がある段階で機体を定常滑空状態としたのち、再び降下を行って対気速度を得る半ダイブ飛行とした。半ダイブ飛行により引き起こし失敗によるリスクを軽減し、確実な飛行と大記録の両立を意図した。

これらのコンセプトをもとに機体の設計を行った。空力設計ではフリーソフトのXflr5を用いて翼型および三次元翼の解析を行った。図2に解析で用いたモデルを示す。主翼翼型は人力飛行機用に開発された翼型のDAE-11を改良したTAKUMI-11を主とし、翼端にはTAKUMI-7034を使用した。TAKUMI-11は翼厚14%を確保しつつ C_l/C_d 値を増大させた翼型であり、定常滑空時の性能向上が達成された。翼端のTAKUMI-7034はSD-7034を改良した翼型であり、失速特性が穏やかで翼端失速の防止に貢献する。翼平面形は5段テーパ翼とした。また、ロール安定性強化のため、2段上反角構造をとった。表1に具体的な機体諸元を示す。構造設計について説明する。構造の安全率は1.5と設定した。主翼、尾翼、テールビームの一次構造体にはCFRP製の中空丸パイプを使用した。主翼の一次構造材（主桁）の設計に際しては、荷重条件、フライト時の主翼のたわみ、および質量を考慮して独自の積層構成を考案した。曲げ剛性の増大と軽量化を両立させるため、翼厚方向にのみ 0° 層（スパン方向）を追加積層する部分積層や、全幅が大きい機体に陥りがちな翼の振じれを解消するため、 45° 層を追加して振れ剛性を向上させた。これらの設計は有限要素法を用いた構造解析を用いて、たわみ量、振り角度、せん断ひずみ、および縦ひずみにおいて評価を行った。主翼上反角の構造を図3に示す。この構造は桁を切断せずに任意の上反角をつけることが可能であり、安全性の向上と構造重量の削減につながった。図4に主翼構造を示す。主翼は琵琶湖への輸送を考慮して主翼が7分割できる構造となっている。その他にもテールビーム、水平尾翼、垂直尾翼、コックピットが分割できる構造となっている。

コックピットはパイロットの安全にかかわる部分であり、安全率を2以上と大きく取った。設計ではパイロットの身体計測を行い、体格に

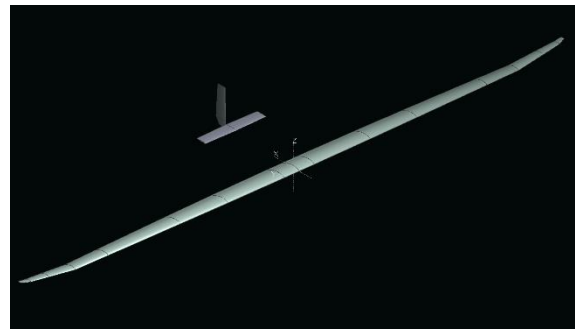


図2 空力解析モデル。

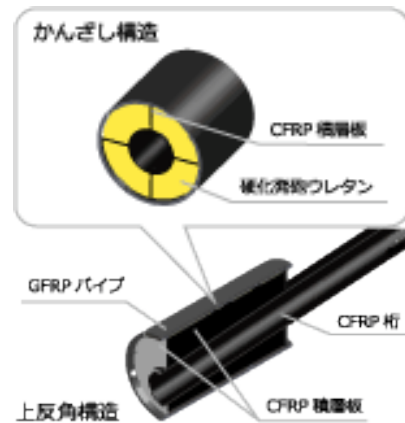


図3 上反角構造。

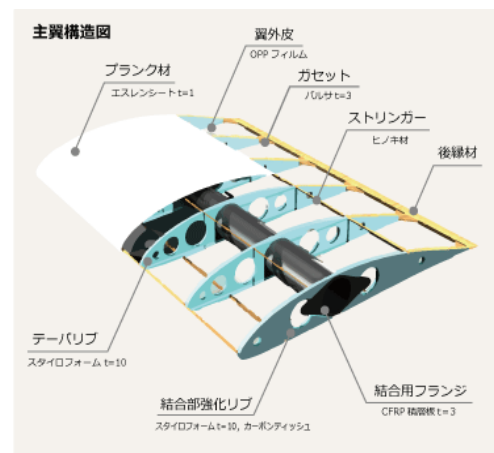


図4 主翼構造図。

表1 機体諸元。

全長	5.28m
全幅	25.30m
全高	1.70m
全機重量	98kgf
機体重量	38kgf
重心位置	35%MAC
桁強度	1.5G以上
滑空比	54.2
滑空速度	10.0m/s
操縦方法	重心移動

合わせて前方投影面積を極限まで減少させた。コックピットはラーメン構造のフレームをフェアリングで覆う形状とした。フレームは重量、強度および製作性を考慮し、A6063を使用した。フェアリングは発砲スチロール(発砲率30倍、60倍)を使用した。また、従来のコックピットはパイロットの背面にデッドスペースが存在したが、「Squalo」においては図5に示すようにコックピットフレームに段差を設けることでデッドスペースの削減を行った。また、段差部分の空間に主翼を取り付け、従来より120mm湖面に近づくことが可能な機体となった。このことにより地面効果を強く受け、着水までの時間を延ばすことにつながった。コックピットの形状変更により、機体は中翼機に近い特性の機体となった。

電装は機体制御およびフライトデータの取得のために用いた。電装ではデータの取得および操舵を行う。計器は加速度、地磁気、気圧、GPSセンサを搭載した。これらはSDカードのログとBluetooth通信が可能である。これはテストフライト時にリアルタイムでのピッチ操作の監視にも使用している。制御にはArduinoを用いた。ロール、ピッチ、ヨーの計測、対地速度はGPSと時間経過より求めた。高度は気圧計より求めた。

操舵はサーボモータを用いて垂直尾翼をオールフライング方式で動作する構造とした。2016年出場機体「匠」では実用的に垂直尾翼の制御が可能であった。これによりヨー方向の制御による確実なフライトを目指した。しかしながら、フライト結果により操作性の問題が浮上した。フライトでは離陸直後に左旋回し、危険回避のため緊急着水させた。この原因がのちにパイロット誤操作であると判明した。垂直尾翼はコックピット内フレームに設置されているボタンを押すことによって作動する。左手側のボタンを押すと機首が左に、右手側のボタンを押すと機首が右に向くよう垂直尾翼が動くようシステムが組まれている。なお、2016年度出場機体ではこの際両方のボタンを押したとき左に機首が向くようにプログラムが組まれていた。パイロットは離陸直後に左側または両方の垂直尾翼制御のスイッチを押してしまったと考えられる。これは単純な操作ミスではなく、ソフト面の不備、およびパイロットへの伝達不足が原因と考えた。よって両方ボタンを押したときは初期位置($\pm 0^\circ$)に戻るシステムを取ることに加えてパイロットに入念な取扱説明とボタンを意識した離陸練習、テストフラ



図5 コックピットフレーム。

イトでのパイロットが機体に乗り込んだ状態でのラダー動作確認を行った。

鳥人間コンテストの大会の性質上、機体は必ず着水するため、電装は防水性のある容器に格納し、着水後に確実なデータの回収を行えるように配慮した。

3 機体製作及び試験

機体の製作は熟練の部員によってすべての部品が手作りされており、各年代の部員の多大な努力によって精度を追求している。また、様々な学科の部員がそれぞれの専門知識を持ち合わせて、製作手法の改善に取り組んでいる。以下、製作方法について説明する。主翼のリブはスタイロフォームを電熱線カッターにより切り出して製作した。主翼結合部のリブにはカーボンティッシュを張り付けた強化リブを使用して強度の向上を図った。主桁へのリブの取り付けでは精度を追求するため、トランジットを用いてリブ付けを行った。主翼の製作は三次元翼をいかに再現できるかが鍵であり、機体製作においても特に精度が要求されている。

コックピット製作では5つの部品から構成されており、結合部を限りなく少なくし、軽さと強度を両立させた。加工には電熱線カッターを用いた。キャノピーはスタイロフォームを積み重ね、周りに石膏を固めて型をつくり、ヒートプレスして行い成型を行う。材料にはPETを使用した。また、パイロットの安全に配慮し、衝撃吸収材を設置した。衝撃吸収材には $t=30$ のハニカム構造段ボール及び $t=50$ のスポンジを使用した。

構造強度の実証のために機体製作と並行して荷重試験を行った。荷重試験では主桁に定常滑空時に生じる荷重の1.5倍の負荷を与えることで、構造材および結合部の健全性確認、およびたわみの計測を行った。試験結果、局所的な破壊なども無く、たわみの実験値と解析値は良好な一致を示し、構造設計の妥当性

を確認できた。また、複数回にわたりパイロットと機体の重心測定試験を行った。これはパイロットに細かい機体ピッチ方向の操作を覚えさせることにより、本番フライトでの致命的な機体制御のミスを防ぐためである。また、本番直前には離陸練習を行った。離陸練習では左右翼持ちの連携確認を行い離陸時の機体のロール方向の安定を計った。離陸時のピッチ操作はパイロットが乗り込むまでの間テール持ちに委ねられている。そこで離陸を想定したテール持ちの練習を行った。機体完成後テストフライトを終えたのちプラットホームを想定し10 mの区間で理想機体速度までの加速、機体保持の練習を重ねた。

完成機体の性能の確認にはテストフライトを行った。テストフライトでは人間曳航法を用いた。目的として第一にパイロットを機体に慣れさせることがある。さらに左右揚力差、水平尾翼取付角度、垂直尾翼の動作確認を行った。パイロットは実際に機体に乗込み機体性能の確認、定常滑空の感覚を覚える。場所は日本大学生産工学部実習キャンパス、サッカー場で行った。フェアリングを除く完全機体で行い、機体組み上げなどの本番で発生するトラブルを確認し対策を取った。

4 本番フライト結果および考察

当日は天候に恵まれ、プラットホーム正面から微風が吹く飛行に適した条件であった。実際のフライトでは入念な準備により、機体はほぼ水平に離陸し、直後に降下体制に入った。ここでパイロットは設計時に意図した通りに機体を引き起こし、その後再度降下体制に入る半ダイブ飛行を成功させた。機体は水面付近を飛行し続け、その後着水した。結果は440.37 mという大記録であり、津田沼航空研究会は13回目の出場で滑空機部門を初めて制覇した。

今回初めてGPSデータ、対地速度、高度、ロール、ピッチ、ヨーの記録の採取に成功したことにより、フライトの詳細が判明した。図7は地図上にGPSデータより取得した飛行経路を示した図である。機体は離陸後、ほぼ直進したことがわかった。これは機体の巡航速度を増大させたことによる直進性の向上であると考えられ、設計コンセプトを忠実に再現できた結果であるといえる。さらに、フライト後のパイロットへの聞き取り調査によりフライト中、機体は大きく頭下げモーメントが発生していたことが分かった。これは地面効果による機首下げ



図6 テストフライトの様子。



図7 取得した飛行経路。

モーメントの発生であると考えられ、機体が地面効果を積極的に利用できたと考えられる。

しかしながら、コックピットの小型化によりパイロットの体型に最小限の空間のみであったため、動作によってフライト中にフェアリングの一部が脱落した。今後、飛行中パイロットの動作を考慮した設計を行う必要がある。

今回の成功にはフライトプランに即した機体設計、精度の良い機体製作、試験方法およびその年間スケジュールが確立されたことが大きく起因している。これはものづくりの基礎にあたる部分であり、津田沼航空研究会のものづくりが長い歴史の中で確立されていった結果であるといえる。

5 結言

鳥人間コンテスト滑空機部門での優勝を目指して滑空機の開発を行った。以下にその取り組みと結果を示す。

- (1) 高アスペクト・高翼面荷重を基本とする機体コンセプトを確立した。
- (2) これまでの機体の問題点を克服し、信頼性の高い機体の開発ができた。
- (3) 鳥人間コンテスト滑空機部門で440.37 mの記録を残し優勝した。

今後の展望としては、フライトデータを安定的に取得し、得られたデータを用いてさらなる記録の更新を目指す。